

Új módszerek üvegszálás poliészter kompozit csövek mechanikai tulajdonságainak  
pontosabb mérésére  
Czél G., Czigány T.

Accepted for publication in Műanyag és Gumi  
Published in 2009  
DOI:

# Új módszerek üvegszál-as polieszter kompozit csövek mechanikai tulajdonságainak pontosabb mérésére

CZÉL GERGELY\*  
egyetemi tanársegéd

DR. CZIGÁNY TIBOR\*  
tanszékvezető egyetemi tanár

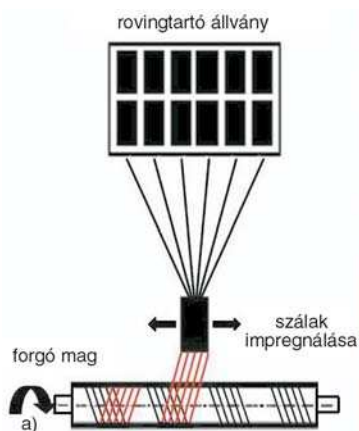
## 1. Bevezetés

A szálerezítésű kompozit anyagoknak számos előnyös tulajdonsága van, amelyeknek köszönhetően nemcsak a legfejlettebb iparágak (űrtechnológia, technikai versenysportok, katonai repülés) kedvelt alapanyagai, hanem a mindennapi élet számos területén is használatosak. Gyermekünk üvegszál-as kompozit csúszdán játszanak a játszótéren vagy az élményfürdőkben, ahol a megfelelő súrlódási viszonyok eléréséhez szükséges vizet is szállíthatjuk nagy szilárdságú tekerceselt kompozit csövekben, majd használat után elvezethetjük a szintén kompozit bélésű csövekkel rekonstruált települési főgyűjtőcsatornán keresztül. A polimer mátrixú kompozitok két legfontosabb előnye a nagy szilárdsággal párosuló kis sűrűség és a korrózióállóság. Mindemellett rendkívül sokoldalúak, köszönhetően egyrészt a szálstruktúra megtervezésével a terhelésekhez igazítható teherbírásnak [1, 2], másrészt a maximális formai szabadságot biztosító olcsó gyártási technológiáknak. A felsorolt tulajdonságok egyebek mellett az évtizedekre tervezett [3] technológiai- és csatornacsövek, valamint a nagynyomású tartályok [4] területén is versenyképesek teszik a polimer kompozitokat a fémes- és egyéb polimer anyagcsaládokból készült termékekkel. Csövek és tartályok száltekerceselési gyártástechnológiájának elvi vázlata az *1a. ábrán*, egy tipikus termék, a szabályos tojás szelvényű csatornacső bélés pedig az *1b. ábrán* látható. A kompozitokban rejlő lehe-

tőségek kihasználásához, illetve az állandó kiváló minőség biztosításához meg kell ismernünk tulajdonságaikat, majd ezek alapján gondosan megtervezni a belőlük készülő termékeket. Polimer kompozitok alkalmazásakor az anyagszerkezet bonyolultsága miatt nagyobb szerep jut a különböző próbatest- és termék szintű vizsgálatoknak, mint az acélok esetében [5]. A tervezésnél és az anyagok pontos megválasztásánál figyelembe kell venni a polimer kompozitok fokozott érzékenységét a környezeti hatásokra, elsősorban a nedvességre [6], a hőmérsékletre és az UV sugárzásra, illetve biztosítani kell a szükséges védelmet a felsoroltakkal szemben. Cikkünk két, speciálisan a száltekerceselési technológiával készült kompozit csövekre jellemző mérés-technikai probléma megoldására tesz javaslatot.

## 2. Tengelyirányú szakítóvizsgálat kiértékelési módszer

A polimer kompozitból száltekerceseléssel készült csövek előnye a tekerceselési szöggel beállítható anizotrópia, ami akár egyenszilárdságot is eredményezhet, maximálisan kihasználva az anyag merevségét és teherbírását. Az anizotrópiával azonban együtt jár az is, hogy nem lehet általános érvénnyel használni egyetlen rugalmassági modulusz és szilárdság értéket, hanem ezeket minden jelentős irányban (csövek esetén kerületi- és tengelyirány) meg kell mérni. A kerületi irányú tulajdonságok gyűrű-



1. ábra. a – Száltekerceselési technológia elvi vázlata, b – száltekerceseléssel készült csatornacső bélések

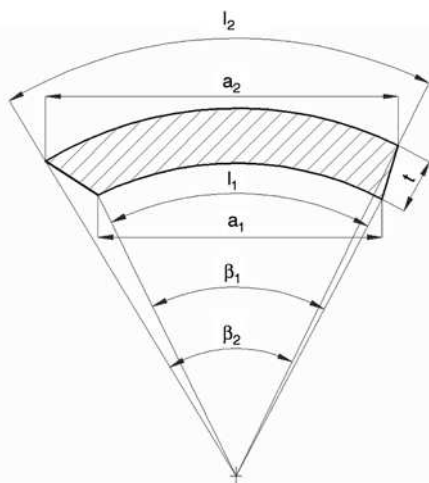
\*BME Polimertechnika Tanszék

vizsgálattal határozhatók meg, a tengelyirányú jellemzők pedig szakítóvizsgálattal mérhetők. Az ÖNORM B 5161 számú osztrák szabványra azért esett a választásunk, mert ebben kifejezetten üvegszál erősítésű polimer kompozit csövek vizsgálatára találhatók előírások, és széles körben alkalmazzák Európa-szerte. A szabvány a szakítóvizsgálatokhoz 300×30 mm-es téglalap alakú próbatesteket ír elő a vizsgálandó csövekből tengelyirányban kivágva (2. ábra).



2. ábra. Üvegszál erősítésű poliészter kompozit csőből kivágott tengelyirányú próbatest és annak keresztmetszete

A csövek görbült felületéből kimetszett próbatesteket azonban lehetetlen a szakítógépi sík pofái közé befogni. Ezért egy vágott üvegszállal töltött epoxi ragasztó keverék segítségével a próbatestek végeire üvegszál-as poliészter lemezeket ragasztottunk. A lemez és a próbatest felületei közti rést a vastagon felvitt ragasztókeverék töltötte ki, a felesleg pedig kinyomódott a résből. A szakítóvizsgálat kiértékeléséhez szükséges keresztmetszeti terület a csőből tengelyirányban kivágott próbatestnél ideális esetben gyűrűcikk alakú lenne, a vágási pontatlanságok miatt azonban ezt a gyakorlatban kézi eszközökkel nem tudjuk elérni. A 3. ábra a próbatestek keresztmetszetét mutatja általános esetben.



3. ábra. Csőből hosszirányban kivágott szakító próbatest keresztmetszeti geometriai paraméterei általános esetben

A tengelyirányú rugalmassági modulusz és a szakítószilárdság kiértékeléséhez szükséges próbatest keresztmetszeti területek becslésére kidolgoztunk egy közelítő eljárást, amelyet az (1–5) összefüggésekkel foglaltunk össze (jelölések a 3. ábra szerint):

$$T = \frac{l_1 + l_2}{2} \cdot t \quad (1)$$

$$l_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_b \cdot \beta_1}{360} \quad (2)$$

$$l_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_k \cdot \beta_2}{360} \quad (3)$$

$$\beta_1 = \arccos \left( \frac{2 \cdot r_b^2 - a_1^2}{2 \cdot r_b^2} \right) \quad (4)$$

$$\beta_2 = \arccos \left( \frac{2 \cdot r_k^2 - a_2^2}{2 \cdot r_k^2} \right) \quad (5)$$

ahol  $T$  a keresztmetszeti terület,  $l_1$  a belső ív hossza,  $l_2$  a külső ív hossza,  $t$  a cső falvastagsága,  $r_b$  a cső belső sugara,  $r_k$  a cső külső sugara,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  középponti szögek,  $a_1$  a próbatest szélessége a belső sugáron mérve,  $a_2$  a próbatest szélessége a külső sugáron mérve.

A próbatest tényleges keresztmetszetét olyan trapéz-zal helyettesítettük, amelynek alapjai megegyeznek az  $l_1$  és  $l_2$  ívhosszakkal, magassága pedig megegyezik a cső  $t$  falvastagságával ( $T_{kétféves}$ ). A számítási módszer alkalmas a próbatestek kivágásakor keletkező pontatlanságok kezelésére, mivel nem követeli meg, hogy a belső és a külső ívekhez tartozó  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  középponti szögek azonosak legyenek. Az összefüggések felírásakor azzal a feltételezéssel éltünk, hogy a cső falvastagsága állandó a metszet szélessége mentén. A csövek belső átmérőit kivágás előtt, falvastagságait és szélességeit szakítás után a tönkrement próbatesten mértük minden esetben a törés helyén. A törés utáni méréseket a próbatestek teljesen rugalmas viselkedése tette lehetővé. A vizsgálatok során egyszer sem tapasztaltunk képlékeny vagy maradó alakváltozást. Két durvább közelítést is vizsgáltunk a keresztmetszet alakjának becslésekor. Először egy  $a_1$  és  $a_2$  alapú,  $t$  magasságú trapéz ( $T_{trapéz}$ ), majd azonos középponti szögekből számolt ívhosszakra visszavezetett,  $t$  magasságú trapéz használtunk helyettesítő síkidomként ( $T_{ívstrapéz}$ ). Kísérletet tettünk továbbá a próbatest keresztmetszet gyűrűcikkkel történő közelítésére. A vágási pontatlanságok kiküszöbölésére a próbatest belső és külső íveihez tartozó gyűrűcikk területeinek számtani középértékét használtuk. Megvizsgáltuk az ismertetett és az alternatív számítási módszerekkel kapott területek közötti különbségeket, valamint egy próbatestből kivágott 5 metszetet síkágyas szkennelvel digitalizáltunk, majd képfeldolgozó szoftverben (*AnalYSIS*) számítottuk a metszetek területeit ( $T_{szkennelt}$ ). A számítások eredményeit az 1. táblázat tartalmazza, ahol  $r_b$  a próbatest belső sugara,  $r_k$  a külső sugár, a többi geometriai méret pedig a 3. ábra szerinti.

Mind a négy számítási módszer nagyon hasonló ered-

**1. táblázat.**  
Csőből hosszirányban kivágott próbatestek különböző módszerekkel számított és képfeldolgozás segítségével mért keresztmetszeti területei

	$r_b$ mm	$t$ mm	$r_k$ mm	$a_1$ mm	$a_2$ mm	$T_{\text{trapéz}}$ mm <sup>2</sup>	$T_{\text{ivestrapéz}}$ mm <sup>2</sup>	$T_{\text{kétféves}}$ mm <sup>2</sup>	$T_{\text{gyűrűcikk}}$ mm <sup>2</sup>	$T_{\text{szkennelt}}$ mm <sup>2</sup>
1	100,00	4,15	104,15	26,10	26,80	109,77	110,88	110,08	110,09	112,30
2	100,00	4,20	104,20	25,80	27,06	111,01	110,94	111,32	111,31	113,20
3	100,00	4,50	104,50	25,40	26,74	117,32	117,19	117,64	117,63	117,70
4	100,00	4,50	104,50	25,50	26,70	117,45	117,65	117,77	117,77	118,00
5	100,00	4,20	104,20	25,83	26,96	110,86	111,07	111,17	111,17	112,00
Átlag	100,00	4,30	104,30	25,70	26,90	113,28	113,55	113,59	113,59	114,64

ményt szolgáltat és nagyon jól egyezik a képfeldolgozással nyert terület értékekkel. Mivel mindegyik módszer ugyanazokat a geometriai paramétereket használja fel a polimer kompozit csövek tengelyirányú szakítóvizsgálatainak kiértékeléséhez, a különböző középponti szögekhez tartozó trapéz területét számító eljárást ajánljuk, mert ez szolgáltatja az optikai úton mért területekkel leginkább egyező eredményeket.

### 3. Egyenetlen külső felületű kompozit csövek új falvastagság mérési módszere

Tekercselt kompozit csövek esetén általános jelenség, hogy mivel a termék csak a belső felületén érintkezik a szerszámmal, a cső falvastagsága pontról pontra változik a külső felület egyenetlensége miatt. Az ilyen csövek falvastagságát a kerület mentén végzett lehető legnagyobb számú mérés átlagából célszerű megállapítani. Az átlagolás sem képes azonban minden hibát kiküszöbölni, mivel a hagyományos mérőeszközök (tolómérő, mérőóra) a tapintóik között található legkiemelkedőbb anyagi ponthoz tartozó értéket jelzik. Emiatt, ha a tolómérő tapintói közé mélyen becsúsztatva mérjük a csövek falvastagságát, átlagosan nagyobb értékeket kapunk, mintha a cső vágási élének szűk környezetét tapintjuk, mivel a cső egyenetlen külső falának kiemelkedő részei „feltartják” a mérőeszköz tapintóit, holott az átlagos falvastagság jóval kisebb mint a helytelenül megmért. A bizonytalan falvastagság mérésből adódó számítási pontatlanságok hatványozottan jelennek meg hajlításra igénybevett szerkezet esetén, mivel a másodrendű nyomaték a harmadik hatványon tartalmazza a falvastagságot.

A gyűrűnyomás jellegű terhelés tipikusan hajlításra veszi igénybe a vizsgált csöveket, ezért az ilyen típusú mérések kiértékelése érdekében szükséges a csövek átlagos falvastagságának pontosabb megállapítása. Az említett lokális egyenetlenségeken kívül, a körtől eltérő szelvényű tekercselt csövek esetén gyakran előfordul, hogy a keresztmetszet mentén periodikusan változik a falvastagság. Szabályos tojás szelvényű csöveink falvastagságának mérésére is alkalmas módszerünk kifejlesztésekor a periodikus jelenségek miatt jelentkező globális ingado-

zásokat is figyelembe kellett vennünk. Tolómérős falvastagság méréskor fennáll a veszély, hogy a körtől eltérő szelvény bizonyos részeit helytelenül „súlyozzuk” több vagy éppen kevesebb mérési pont felvételével. A legjobb átlagolást megvalósító módszernek a

próbatess falvastagságának a térfogatából történő származtatása mutatkozott, amely mind a lokális, mind a globális változások kiegyenlítésére képes.

A próbatestek hossza a pontos vágási technológia eredményeképpen kis szórást mutatott, így ennek hagyományos méréssel történő meghatározása nem okozott gondot. A próbatestek belső felülete szintén jó minőségű és méretpontos volt, a paraméterek kör szelvény esetén hagyományos méréssel, tojás szelvény esetén pedig a szerszámgeometria feltételezésével váltak ismertté. A térfogatot a próbatestek levegőn és víz alá merített állapotban végzett tömegmérésével határoztuk meg. Mivel az ioncserélt víz sűrűsége 1 g/cm<sup>3</sup>, a próbatestek térfogata (cm<sup>3</sup>-ben kifejezve) éppen megegyezett a levegőn és a víz alá merített állapotban elvégzett tömegmérések eredményének különbségével ( $V = m_l - m_v$  [cm<sup>3</sup>] és [g]-ban helyettesítve). Kör szelvény esetén a mért térfogatból, próbatess hosszából és a belső átmérőből (sugarából) számított falvastagság a (6) összefüggéssel írható fel.

$$t_v = \sqrt{r_b^2 + \frac{V}{\pi \cdot l}} - r_b \quad (6)$$

ahol  $t_v$  [mm] a cső térfogatból számított falvastagsága,  $r_b$  [mm] a cső belső sugara,  $V$  [mm<sup>3</sup>] a próbatess térfogata,  $l$  [mm] a gyűrű próbatess hossza.

Tojás szelvény esetén a térfogatnak a sugarak függvényében történő felírásának érdekében a szelvényt azonos sugarú szakaszokra kell felbontani. A térfogat a 4. ábra szerinti szabályos tojás szelvény négy részre bontása után az ismert középponti szögtartományokat felhasználva a (7) összefüggéssel írható fel

$$V_t = ((R + t_v)^2 - R^2) \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{180^\circ}{360^\circ} + 2 \cdot ((3R + t_v)^2 - (3R)^2) \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{36,87^\circ}{360^\circ} + \left( \left( \frac{R}{2} + t_v \right)^2 - \left( \frac{R}{2} \right)^2 \right) \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{2 \cdot 53,17^\circ}{360^\circ} \quad (7)$$

ahol  $R$  [mm] a tojás szelvény jellemző belső sugara, a  $t$  index a tojás szelvényre utal.

Az egyenletet zérusra rendezve és egyszerűsítve a (8) összefüggést írhatjuk fel:

$$0 = 3,14 \cdot l \cdot t_V^2 + 7,93 \cdot l \cdot R \cdot t_V - V_f \quad (8)$$

Az egyenletet megoldva adódik a gyűrű falvastagsága. Az új módszer használhatóságát három eltérő névleges falvastagságú tojás szelvényű csőből kivágott 2–2 próbatesten vizsgáltuk. Mind a hat próbatest mindkét peremén 10–10 ponton (összesen 120 pozícióban) mértük a falvastagságot,  $R = 80$  mm volt egysége. A hagyományos (tolómérő) és az új módszerrel mért és számított jellemzőket a 2. táblázat tartalmazza.

Az új módszerrel számított  $t_V$  értékek maximum 4%-kal térnek el a tolómérővel végzett nagyszámú mérés átlagától. Amíg a mért falvastagságok relatív szórása elérte a 7–8%-ot, addig a próbatest hosszúságok relatív szórása minden esetben 3% alatt maradt, azaz a hossz mérés jóval pontosabb, mint a falvastagság mérés. Az első négy próbatestet kézi gyémántkorongos szerszámmal, az 5. és a 6. próbatestet pedig nagy átmérőjű tárcsával felszerelt merev gépen vágtuk ki úgy, hogy a csövet vágás közben leszorítottuk a gép asztalára. A speciális vágási eljárás szembetűnően kis (0,5% alatti) relatív szórásokat eredményezett a próbatest hosszúságoknál. Hajlításra igénybevett tekerceszt csövek mechanikai vizsgálatának kiértékeléséhez és modellezéséhez mérési eredményeink alapján célszerű az új módszerrel, a próbatest térfogatából visszszámolt átlagos falvastagságot használni.

#### 4. Összefoglalás

A polimer kompozit csövek speciális mechanikai vizsgálatai közül a cső hossz tengelyének irányában végzett szakítóvizsgálatokhoz szükséges új próbatest előkészítési és kiértékelési módszerünkkel pontosabban meghatározhatók a csövek tengelyirányú mechanikai tulajdonságai. Innovatív eljárásunkkal mérhető az egyenetlen külső felületű, száltekerceszt polimer kompozit csövek falvastagsága, valamint lehetőség nyílik a hajlító igénybevétellel elvégzett mechanikai vizsgálatok pontosabb kiértékelésére. A két eljárás a szerzők elsődleges szándéka szerint hozzájárul a polimer kompozitok mechanikai tulajdonságainak pontosabb meghatározásához, így növeli az új anyagfípussal kapcsolatos bizalmat a tervező mérnökökben, és végső soron elősegíti a minél szélesebb körben történő elterjedésüket.

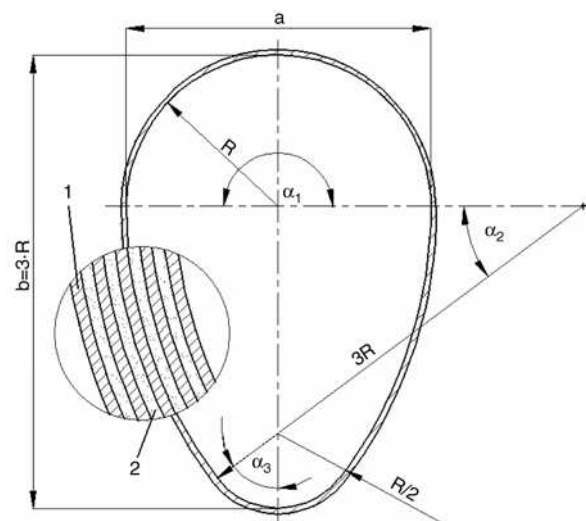
#### 5. Irodalomjegyzék

- [1] Soden, P. D.; Kitching, R.; Tse, P. C.; Tsavalas, Y.; Hinton, M. J.: Influence of winding angle on the strength and deformation of filament-wound composite tubes sub-

#### 2. táblázat.

#### Hagyományos és új módszerrel mért falvastagságok tojás szelvényű kompozit cső esetén

$R = 80$ mm	$t$ , mm	$m_i$ , g	$m_v$ , g	$V_f$ , cm <sup>3</sup>	$l$ , mm	$t_V$ , mm	
1	bal oldal jobb oldal	4,16±0,320 4,27±0,323	255,37	113,74	141,63	49,61±0,401	4,40
2	bal oldal jobb oldal	4,24±0,276 4,21±0,173	253,56	113,75	139,81	50,14±1,34	4,30
3	bal oldal jobb oldal	3,06±0,178 3,03±0,221	184,92	87,46	97,46	48,96±0,91	3,09
4	bal oldal jobb oldal	2,83±0,206 2,90±0,221	181,62	86,88	94,73	49,16±0,61	2,99
5	bal oldal jobb oldal	2,50±0,063 2,41±0,145	118,53	57,54	60,99	40,10±0,12	2,38
6	bal oldal jobb oldal	2,48±0,154 2,41±0,145	116,94	56,77	60,17	39,89±0,18	2,34



4. ábra. Szabályos tojás szelvény,  $\alpha_1 = 180^\circ$ ,  $\alpha_2 = 36,87^\circ$ ,  $\alpha_3 = 53,13^\circ$ , 1 –  $+\theta$  szögben tekerceszt réteg, 2 –  $-\theta$  szögben tekerceszt réteg

jected to uniaxial and biaxial loads, Composites, Science and Technology, 46, 363–378 (1993).

- [2] Hull, D.; Spencer, B.: Effect of winding angle on the failure of filament wound pipe, Composites, 9, 263–271 (1978).
- [3] Lukács, J.: Dimensions of lifetime management, Materials Science Forum, 473–474, 361–368 (2005).
- [4] Varga, L.; Nagy, A.; Kovács, A.: Design of CNG tank made of aluminium and reinforced plastics, Composites, 26, 457–463 (1995).
- [5] Czél, G.; Czigány, T.: Development and analysis of new filament wound composite pipes made of glass fiber reinforced 3P resin, Macromolecular Symposia, 239, 232–244 (2006).
- [6] Czél, G.; Czigány, T.: A study of water absorption and mechanical properties of glass fiber/polyester composite pipes - effects of specimen geometry and preparation, Journal of Composite Materials, 42, 2815–2827 (2008).